

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 9日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21740216

研究課題名（和文） 超弦理論が宇宙とブラックホールの量子論に与える示唆

研究課題名（英文） Implications of superstring theory for cosmology and black hole physics

研究代表者

関野 恭弘 (Yasuhiro Sekino)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究員

研究者番号：50443594

研究成果の概要（和文）：超弦理論によると、我々の宇宙は「永久インフレーション」におけるバブルの生成によってできたと考えられる。そのような宇宙に関する非摂動的定式化を構成した。また、永久インフレーションに様々な相が存在する事を示し、我々の宇宙の性質は相に応じて異なる事を指摘した。さらに、宇宙背景放射の温度揺らぎの新しい生成メカニズムを提案した。超弦理論によると、ブラックホールは行列の量子力学により記述されると考えられている。その行列模型の相関関数を解析的および数値的手法で求めた。

研究成果の概要（英文）：Superstring theory suggests that our universe was created by bubble nucleation in eternal inflation. We constructed a non-perturbative formulation for such a universe. We showed that there are various phases in eternal inflation, and pointed out that the properties of our universe depend on the phase. We also proposed a new mechanism for the generation of temperature fluctuations of cosmic microwave background radiations. Superstring theory suggests that black holes are described by quantum mechanics of matrices. We computed correlation functions of such a matrix model by using analytical and numerical methods.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子論、宇宙物理

## 1. 研究開始当初の背景

量子重力の理論である超弦理論は、初期宇宙やブラックホールといった強い重力場中の物理に重要な示唆を与えると期待されている。

「超弦理論のランドスケープ」と呼ばれる

最近の発展によると、我々の宇宙は、加速膨張している宇宙の中でのバブルの生成によって出来たと考えられる。バブルの生成は、統計系の一次相転移に類似のものであるが、準安定な真空が加速膨張しているため、偽の真空の膨張率が真の真空のバブルの生成率に比べて小さいと、偽の真空が永遠に存在し

続ける、いわゆる「永久インフレーション」が起こる。これまでのランドスケープや永久インフレーションの解析は、低エネルギー有効理論と準古典近似に頼っていた。ランドスケープの考え方に理論的基礎を与え、超弦理論の観測への示唆を明らかにするためには、近似的でない非摂動的定式化を確立することが重要な問題となっている。

超弦理論の双対性の発見以来、ソリトンの物体であるDブレーンを基本的構成要素として理論を再構成できる事が分かってきた。特に、M理論（超弦理論の強結合極限）の非摂動的定式化として提案されているBFSS（Banks-Fischler-Shenker-Susskind）行列模型は、ブラックホールのダイナミクスを記述するという点で重要である。例えば、「ブラックホールの情報損失のパラドックス」に対しては、行列模型がユニタリであるためブラックホールの生成と蒸発において情報の損失はない、という結論が示唆される。この行列模型の性質を詳しく理解し、ブラックホールとの対応を明らかにする事が重要であるが、理論の強結合の振る舞いは複雑であり理解されていない。以前、関野と米谷教授の研究で、ゲージ/重力対応（行列模型と超弦理論の等価性）に基づき、相関関数が求められたが、それがほとんど唯一の定量的解析である。そこで求められた結果のより深い理解が課題となっている。

## 2. 研究の目的

バブルの生成によって出来た宇宙に関する非摂動的定式化を確立し、超弦理論の観測への示唆を明らかにする事を目指す。

非摂動的理論がどのようなものかを明らかにするためには、永久インフレーションで起こりうる物理を、低エネルギー近似の枠内で可能な限り詳しく理解する事がまず重要となる。永久インフレーションにおいて、バブルが偽の真空の中でどのような配位をなすか、また、バブル同士の衝突が起こった際、真の真空側の宇宙の時空構造がどうなるか、といった問題を詳しく解析する。

また、バブルの生成によって出来た宇宙における揺らぎの性質を調べ、偽の真空の存在が、我々の宇宙における物理量にどのような影響を与えるかを明らかにする。それに基づき、バブルの生成で出来た宇宙の非摂動的定式化を明らかにする。

さらに、超弦理論が宇宙背景輻射にあたえる影響を明らかにし、超弦理論のパラメータを観測により決定する可能性を探る。

BFSS 行列模型は、（場の理論でなく）量子力学であり、繰り込みの必要が無いにもかかわらず、その強結合での振る舞いは理解されていない。単純な摂動展開は、massless 場の

ループに起因する赤外発散の問題のため適用できず、何らかの非摂動的手法が必要になる。

ここでは、以前に行ったゲージ/重力対応に基づく方法とモンテカルロ・シミュレーションの双方を用いて、この行列模型の相関関数を求める。

## 3. 研究の方法

永久インフレーションにおけるバブルの生成が通常の一次相転移と異なるのは、偽の真空が加速膨張しており、バブルは生成時の宇宙的地平線までしか広がれないという点である。それが原因で、偽の真空の中でのバブルの配位はフラクタル的構造をなす。マンデルブロにより提案されたフラクタル・パーコレーション模型において知られている数学的結果を応用し、永久インフレーションの相構造を明らかにする。

2006年に、サスキンド教授らと共同で、バブルの生成によって出来た宇宙は、その境界（空間的無限遠）に位置する2次元球面上で定義された共形場理論によって非摂動的に定式化出来る事を提案した。宇宙における揺らぎの相関関数を詳しく調べることにより、この2次元共形場理論の詳細な性質を明らかにする。

相補的な問題として、バブルの生成後による宇宙の誕生後に揺らぎが生成されるメカニズムを明らかにする。超弦理論は、10次元で定義されており、コンパクト化された次元に運動量を持つカルツァ・クライン場が存在する。それらの場の質量が宇宙誕生後のインフレーションのスケールに比べて小さい場合、宇宙の曲率揺らぎ（宇宙背景輻射の温度揺らぎに直接関係する揺らぎ）に大きな量子効果を与える可能性があるため、その詳しい解析を行う。

BFSS 行列模型のゲージ/重力対応による解析により、特定の演算子の相関関数は、冪則（冪は自由場のものとは異なる分数）に従う事が分かっている。理論が共形不変でない（結合定数が次元を持っている）にも関わらず、冪則が現れるというのは大変興味深い現象で、より深い理解が望まれる。ここでは、以前にこの行列模型の有限温度での自由エネルギー等の計算に適用され、ブラックホールの熱力学の再現等の目覚ましい成果をあげているモンテカルロ・シミュレーションを用いて、相関関数を解析する。

## 4. 研究成果

論文④において、L. サスキンド教授（スタンフォード大学）、S. シャンカー教授（スタンフォード大学）と共同で、通常、永久イン

レーションと呼ばれている現象に3種類の相が存在する事を示した。これらの相は、偽の真空の中でのバブルの配位の仕方（パーコレーションの仕方）によって分類され、バブルの生成率に応じてどの相が実現されるかが決まる。また、バブルの衝突のダイナミクスを解析し、我々の宇宙の性質は相によって定性的に異なる事を指摘した。

論文⑥において、サスキンド教授と共同で、宇宙の非摂動的定式化に関して様々な側面から研究した。特に、宇宙における時間と非摂動理論における紫外カットオフの関係を明らかにし、未来の極限が連続極限に対応する事を指摘した。また、非摂動理論の自由度の数、宇宙背景輻射のスペクトラムの性質等に関する考察を行った。

論文①、③では、羽原由修研究員（岡山光量子科学研究所）、川合光教授（京都大学）、二宮正夫所長（岡山光量子科学研究所）と共同で、宇宙背景輻射の温度揺らぎの生成の新しいメカニズムを提案した。これは、通常考えられている、スカラー場（インフラトン）の半古典的揺らぎに基づくメカニズムとは異なり、超弦理論に存在する多数の場の純粋な量子効果に基づいている。我々が観測する宇宙背景輻射がこのメカニズムで生成されたとした場合、コンパクト化半径、結合定数といった超弦理論のパラメータがどのような値であるかを議論した。

論文②、④では、花田政範特任助教（KEK）、西村淳准教授（KEK）、米谷民明教授（放送大学）と共同で、BFSS行列模型の2点関数をモンテカルロ・シミュレーションにより解析し、ゲージ/重力対応によって得られた結果を高い精度で確認した。これは、BFSS行列模型の精密な解析というだけでなく、共形不変性を持たない場合のゲージ/重力対応の直接的検証という意味でも重要な成果である。また、ゲージ/重力対応によって求めた答えが、それが有効だと考えられていた範囲（SU(N)理論における大N極限）の外でも正しいようだという興味深い発見があったので、その理由を考察した。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計6件）

- ① Yoshinobu Habara, Hikaru Kawai, Masao Ninomiya and Yasuhiro Sekino, ``Possible origin of CMB temperature fluctuations: Vacuum fluctuations of Kaluza-Klein and string states during inflationary era,’’ *Physical Review D* 査読有（掲載決定）
- ② Yoshinobu Habara, Hikaru Kawai, Masao

- Ninomiya and Yasuhiro Sekino, “CMB Fluctuations and String Compactification Scales,” *Physics Letters B* 707, 198-202 (2012), 査読有
- ③ Masanori Hanada, Jun Nishimura, Yasuhiro Sekino and Tamiaki Yoneya, ``Direct test of the gauge-gravity correspondence for Matrix theory correlation functions,’’ *Journal of High Energy Physics* 1112, 020 (2011), 査読有
- ④ Yasuhiro Sekino, Stephen Shenker and Leonard Susskind, ``On the Topological Phases of Eternal Inflation,’’ *Physical Review D* 81, 123515 (2010) 査読有
- ⑤ Masanori Hanada, Jun Nishimura, Yasuhiro Sekino and Tamiaki Yoneya, ``Monte Carlo studies of Matrix theory correlation functions,’’ *Physical Review Letters* 104, 151601 (2010) 査読有
- ⑥ Yasuhiro Sekino and Leonard Susskind, ``Census Taking in the Hat: FRW/CFT Duality,’’ *Physical Review D* 80, 083531 (2009) 査読有

〔学会発表〕（計19件）

- ① 関野恭弘、2012年3月7日、KEK理論研究会2012、``FRW/CFT duality: A holographic framework for eternal inflation’’, 高エネルギー加速器研究機構
- ② 羽原由修（登壇者）、川合光、二宮正夫、関野恭弘、2012年3月24日、日本物理学会、``A novel source of CMB temperature fluctuations: Vacuum fluctuations of Kaluza-Klein and string states during inflationary era’’, 関西学院大学
- ③ 関野恭弘、2012年1月14日、Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology、``FRW/CFT duality: A holographic framework for eternal inflation’’, 草津市・ホテルビレッジ草津
- ④ 関野恭弘、2011年9月19日、日本物理学会、``FRW/CFT duality: A holographic framework for eternal inflation’’, 弘前大学
- ⑤ 羽原由修（登壇者）、川合光、二宮正夫、関野恭弘、2011年9月17日、日本物理学会、``宇宙背景輻射のゆらぎと超弦理論のコンパクト化半径について’’, 弘前大学
- ⑥ 花田政範、西村淳、関野恭弘（登壇者）、米谷民明、2011年9月16日、日本物理学会、``Non-perturbative studies of Matrix theory correlation functions and the gauge-gravity correspondence’’, 弘

前大学

- ⑦ 関野恭弘、2011年8月6日、Summer Institute 2011、 “Topics in Eternal Inflation”、富士吉田市・富士 Calm
- ⑧ 関野恭弘、2011年6月24日、国際会議 ‘Holographic Cosmology 2.0’、 “Correlation functions in FRW/CFT duality”、Perimeter Institute for Theoretical Physics
- ⑨ 関野恭弘、2011年5月23日、国際会議 ‘Quantum Information in Quantum Gravity and Condensed-Matter Physics’、 “Fast scramblers”、Aspen Center for Physics
- ⑩ 関野恭弘、2011年1月21日、静岡大学素粒子集中セミナー、 “Topological phases of eternal inflation”、静岡大学
- ⑪ 関野恭弘、2010年12月18日、理研シンポジウム「場と弦の理論の新たな発展に向けて」、 “Topological phases of eternal inflation 2”、理化学研究所
- ⑫ 関野恭弘、2010年12月17日、理研シンポジウム「場と弦の理論の新たな発展に向けて」、 “Topological phases of eternal inflation 1”、理化学研究所
- ⑬ 関野恭弘、2010年11月25日、 “International Conference on Physics in Intense Fields 2010”、 “Topological phases of eternal inflation”、高エネルギー加速器研究機構
- ⑭ 関野恭弘、2010年10月4日、IPMU “Focus Week on String Cosmology”、 “Topological phases of eternal inflation”、東京大学数物連携宇宙研究機構
- ⑮ 関野恭弘、2010年9月27日、研究会「重力・幾何・素粒子」、 “Topological phases of eternal inflation”、大阪市立大学
- ⑯ 関野恭弘（登壇者）、Stephen Shenker、Leonard Susskind、2010年9月14日、日本物理学会 “On the topological phases of eternal inflation”、九州工業大学
- ⑰ 関野恭弘、2010年5月16日、Mini-Workshop、 “The Measure Problem in Cosmology”、 “FRW/CFT duality”、Columbia University
- ⑱ 花田政範、西村淳、関野恭弘（登壇者）、米谷民明、2010年3月20日、日本物理学会 “Monte Carlo studies of Matrix theory correlation functions”、岡山大学
- ⑲ 関野恭弘、2009年8月10日、 “Summer School on Decoherence, Entanglement and Entropy”、 “Black Holes as Fast Scramblers”、神戸市・Oxford Kobe Institute

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関野 恭弘 (Yasuhiro Sekino)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究員  
研究者番号：50443594

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者